

05.16.05
Ш 967

V

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт имени
Ленинского комсомола

На правах рукописи

Щуринов Владимир Александрович

УДК 621.774.37-868

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Специальность 05.16.05 -
"Обработка металлов давлением"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1985

Работа выполнена в Уральском научно-исследовательском институте трубной промышленности (УралНИТИ).

Научный руководитель - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Блинов Ю.И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор, лауреат Государственной премии СССР
Осадчий В.Я.;

- кандидат технических наук,
доцент Гуров С.П.

Ведущее предприятие - Синарский трубный завод.


Защита состоится "13" ноября 1985г., в 14 часов,
на заседании специализированного совета К 053.13.03 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола (г. Челябинск, проспект имени В.И. Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "11" октября 1985г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76, ученому секретарю.

Ученый секретарь совета,
доцент, к.т.н.

 О.К. ТОКОВОЙ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В документах партии и постановлениях Советского Правительства отмечается важное значение выпуска высококачественной продукции, отвечающей по своим показателям лучшим современным образцам, а также внедрения прогрессивных технологических процессов и на этой основе существенного повышения производительности труда в народном хозяйстве.

Современная техника, в частности машиностроение и энергетика, ставит задачу производства высококачественных тонкостенных труб и трубных профилей с особыми свойствами, которые не в полной мере обеспечиваются традиционными методами. Процесс деформирования с использованием ультразвуковых колебаний открывает новые возможности для повышения точности и производительности при выпуске таких труб. Отсутствие широких исследований процесса ультразвукового деформирования (У.З.Д.) и, как следствие — слабое обеспечение его расчетным аппаратом, определило актуальность проведенной работы.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса ультразвукового деформирования тонкостенных труб на оправке. Разработка аналитических зависимостей для определения энергосиловых и кинематических параметров, необходимых для проектирования нового оборудования производства тонкостенных труб. Разработка методики расчета ультразвуковой оснастки, обеспечивающей передачу необходимой мощности в очаг деформации. Реализация разработанных рекомендаций путем использования их при проектировании нового оборудования и изготовлении прецизионных труб и профилей.

Научная новизна. Получены аналитические зависимости для определения кинематических и энергосиловых параметров процесса ультразвукового деформирования на оправке тонкостенных труб. Разработана методика учета влияния материала и геометрии технологического инструмента на кинематику и мощность процесса деформирования. Определен энергетический баланс и КПД процесса У.З.Д. Разработана методика расчета ультразвуковой оснастки, обеспечивающей передачу в очаг деформации колебательной мощности, необходимой для получения заданного технологического эффекта: снижения усилия волочения, увеличения степени деформации, получение особотонкостенных и профильных труб.

Практическая ценность. Разработанные расчетные методики впервые позволили осуществить проектирование УЗД установок на заданный технологический эффект. На основе анализа математической модели процесса и оснастки УЗД деформирования разработаны рекомендации по повышению эффективности работы УЗД установкой. Разработанные аналитические зависимости для определения энергосиловых и кинематических параметров необходимы при проектировании технологии и специализированного оборудования для производства тонкостенных холоднодеформированных труб высокой точности.

Разработанные расчетные методики, выводы и рекомендации использованы проектной организацией при проектировании новой конструкции стана ультразвукового волочения труб. Экономический эффект от внедрения результатов работы при производстве тонкостенных и профильных труб составил 130 тыс. рублей.

Апробация работы. Основное содержание диссертации докладывалось на:

- Всесоюзном научно-техническом семинаре "Опыт применения ультразвука в черной металлургии" (г.Тула, 1976г.);
- Всесоюзном научно-техническом семинаре "Опыт применения ультразвука для интенсификации технологических процессов в черной металлургии" (г.Первоуральск, 1981г.);
- Всесоюзной научно-технической конференции "Применение ультразвука в технологических процессах металлургического производства" (г.Запорожье, 1983г.);
- Всесоюзной научно-технической конференции "Новые технологические процессы прокатки, интенсифицирующие производство и повышающие качество продукции" (г.Челябинск, 1984г.);
- Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование производства холоднодеформированных труб" (г.Никополь, 1984г.).

Публикация. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 12 печатных трудах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и выводов, содержит 143 страницы машинописного текста, 53 рисунка, таблицу и приложения. Библиографический список включает 119 наименований.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Возросшие требования к качеству продукции и производительности при производстве осеботонкостенных труб и трубных профи-

лей, требующих интенсивного течения металла в участки калибра с затрудненными условиями деформирования ставят задачу разработки новых прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих высокую точность труб и увеличение производительности при их производстве. В этом плане теоретический и практический интерес представляет процесс волочения с использованием ультразвуковых колебаний рабочего инструмента.

Сравнительный анализ различных способов ультразвукового волочения показал, что для поставленной задачи производства тонкостенных труб и профилей наиболее рациональным является процесс волочения с использованием радиальных колебаний деформирующей волоки - матрицы, который при высокой интенсивности колебаний может быть охарактеризован как процесс ультразвукового радиального деформирования (УЗРД) труб.

Для разработки промышленной технологии УЗРД труб необходимо решить следующие задачи:

- Выполнить анализ процесса деформирования и определить его энергосиловые параметры с учетом влияния упругости технологического инструмента на условия передачи мощности колебаний в очаг деформации.

- Разработать методику расчета ультразвуковой оснастки, обеспечивающей ввод в очаг деформации необходимой колебательной мощности.

- Теоретически и экспериментально исследовать процесс УЗРД с точки зрения определения параметров, влияющих на кинематические условия его протекания; выбора оптимальных параметров оснастки и уменьшения нерациональных потерь энергии.

- Определить эффективность и перспективность применения процесса в промышленных условиях.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В работе выделено теоретическое исследование кинематических и энергосиловых параметров процесса УЗРД, необходимых для разработки технологии производства тонкостенных холоднодеформированных труб, расчета ультразвуковой оснастки и определения технических характеристик оборудования при промышленной реализации процесса. При этом, в конечном итоге, определялись параметры: мощность колебаний, необходимая для осуществления процесса деформирования,

$$N_k = 0,5 Q_m \omega U$$

(I)

и принятый в теории механических колебаний обобщенный параметр "сопротивление нагрузки"

$$R_n = \frac{Q_m}{\omega U} \quad (2)$$

где Q_m - амплитудное значение радиальной колебательной силы, приложенной к очагу деформации со стороны конической матрицы; U - амплитуда колебательных смещений рабочего конуса матрицы, относительно поверхности оправки; ω - круговая частота колебаний.

Указанные параметры необходимы и достаточны для характеристики очага деформации как потребителя колебательной мощности и для анализа кинематических условий работы ультразвуковой оснастки, включая очаг деформации и инструмент.

В дальнейшем под понятием "очаг деформации" понимается его оправочный участок, влияние безоправочного участка учитывается эквивалентным противонапряжением.

При анализе кинематики процесса деформирования был использован метод разбиения периода колебаний на характерные участки (рис.1):

$t_1 - t_2$ - участок деформации металла; $t_2 - t_3$ - участок упругого распрямливания матрицы после окончания деформации; $t_3 - t_4$ - участок подачи заготовки в очаг деформации; $t_4 - t_1$ - участок упругого сжатия матрицы после окончания подачи заготовки до начала следующего цикла. При этом смещения контактной поверхности матрицы относительно оправки имеют вид, близкий к трапецеидальной периодической функции с двойной амплитудой G (рис.2).

Величина "подачи" заготовки W_n в каждом цикле колебаний определяется системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} W_n &= \int_{t_3}^{t_4} V_n dt, \\ W_n &= V_B T - W_{12}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где V_n - скорость "подачи"; W_{12} - участок трубы, "выпрессованный" на выход матрицы на участке деформации,

$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} V_g dt; \quad (4)$$

V_g - скорость металла на участке $t_1 - t_2$ в сечении выхода очага деформации.

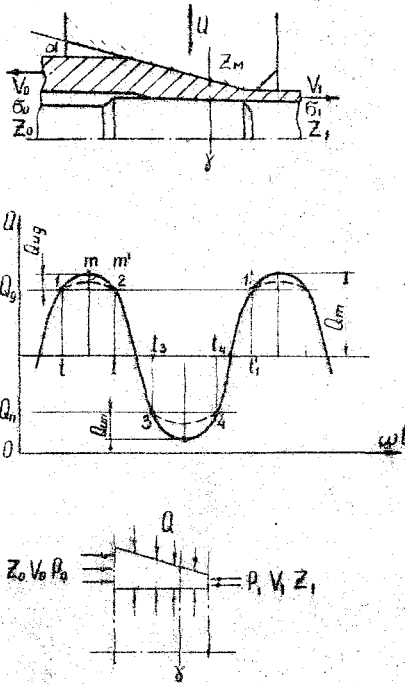


Рис. 1. Схема очага деформации и действующих сил в радиально-колеблющейся матрице

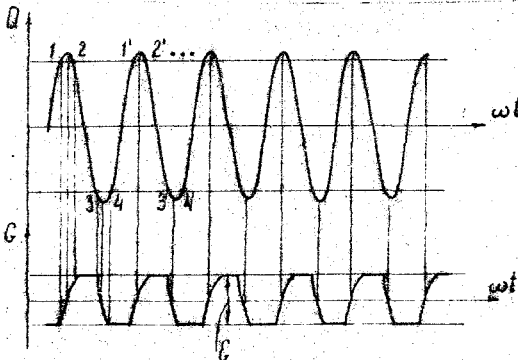


Рис. 2. Эпюра радиальных циклических смещений конуса матрицы относительно контактной поверхности оправки

Система (3) приводится к виду

$$\left. \begin{aligned} G &= W_n \operatorname{tg} \alpha \\ V_0 T &= W_n - W_{12} \\ F_1 W_{12} &= F_2 G K \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где V_0 - скорость волочения; T - период колебаний; α - полуугол матрицы; F_1 - площадь поперечного сечения трубы; F_2 - площадь боковой поверхности очага деформации; K - коэффициент, характеризующий положение нейтрального сечения,

$$K = \rho_1 / \rho, \quad (6)$$

где ρ - осевая длина очага деформации; ρ_1 - осевая длина зоны опережения,

Преобразуя (5), получим

$$G = \frac{V_0 T F_1 \operatorname{tg} \alpha}{F_1 + K F_2 \sin \alpha} \quad (7)$$

Значение G использовалось для нахождения величины U в выражении (1,2). В работе показано, что для величины U справедливо выражение

$$U = \frac{2G}{\pi} \cdot \varphi, \quad (8)$$

где φ - графическая функция, хорошо аппроксимируемая выражением

$$\varphi = 0,8 + 0,26 \sin[0,276(\omega t_1 + \omega t_2 - 4,12)], \quad (9)$$

где ω - круговая частота колебаний.

Величина Q_m (1,2) определяется из выражения (рис.1)

$$Q_m = \frac{Q_1 - Q_n}{\sin \omega t_1 - \sin \omega t_2}, \quad (10)$$

где Q_n - радиальная сила, приложенная к контактной поверхности матрицы в момент начала подачи заготовки в очаг деформации; Q_1 - радиальная сила, приложенная к контактной поверхности матрицы на участке деформации металла. Для величин Q_1 и Q_n получены выражения:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \rho_1 F_2 (\cos \alpha + \mu_+ \sin \alpha), \\ Q_n &= (\sigma_0 F_0 + \sigma_1 F_1) \frac{\cos \alpha + \mu_+ \sin \alpha}{\sin \alpha + \mu_+ \cos \alpha}, \end{aligned} \quad (11)$$

где p_c - среднее нормальное давление на поверхности матрицы при деформации; μ_T - коэффициент трения; σ_0, σ_1 - осевые напряжения на входе и выходе очага деформации.

Значение критических точек t_1, t_3 выражения (10) определяли, решая уравнение скорости смещения конуса матрицы относительно поверхности оправки на участках $t_1 - t_2$ и $t_3 - t_4$:

$$\frac{d}{dt} G_{12} = \frac{1}{Z_M + Z_g} (Q_M \sin \omega t - Q_m \sin \omega t_3 + Q_n - Q_g), \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} G_{12} = \frac{1}{Z_M + Z_g} (-Q_M \sin \omega t + Q_m \sin \omega t_3 + Q_n - Q_g).$$

Здесь Z_M - волновое сопротивление матрицы; Z_g, Z'_n - приведенное волновое сопротивление заготовки при деформации и подаче.

Интегрированием (12) в пределах соответствующих участков, получена система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{[\cos \omega t_1 - \sin \omega t_1 (\pi/2 - \omega t_1)]}{\sin \omega t_1 - \sin \omega t_3} &= \frac{\omega G (Z_M + Z'_g)}{2(Q_g - Q_n)} \\ \frac{[\cos \omega t_3 - \sin \omega t_3 (\pi/2 - \omega t_3)]}{\sin \omega t_1 - \sin \omega t_3} &= \frac{\omega G (Z_M - Z'_n)}{2(Q_g - Q_n)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Значения Z'_g, Z'_n определялись из условия, что мощность, затрачиваемая на преодоление приведенного волнового сопротивления, равна сумме мощностей, затрачиваемых на преодоление волновых сопротивлений заготовки и трубы соответственно на участках деформации и подачи. Получены выражения в виде

$$\left. \begin{aligned} Z'_g &= Z_1 \left(\frac{F_K}{F_1} \right)^2 \cos^2 \alpha \left[K + \frac{1}{\mu} (1 - K^2) \right] \\ Z'_n &= \frac{1}{t_3^2 \alpha} (Z_1 + Z_0) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Таким образом, из уравнений (12) определялись значения $\omega t_1, \omega t_3$, выражения (8) и далее, с учетом (6,7), вычислялись значения колебательной мощности N_K и параметра "сопротивление нагрузки" R_n выражения (2,3).

Аналитическое решение уравнений (13) представляет известные трудности, поэтому для вычислений были разработаны номограммы и специальные программы решения на ЭЦМ.

Приведенная методика позволила определить значения Q_m, U при известной величине коэффициента положения нейтрального сечения K и среднего удельного давления p_c . Методы определения

указанных величин хорошо разработаны в работах В.Н.Выдрина, В.П.Северденко и др. авторов и не вызывают принципиальных затруднений.

Специфической особенностью процесса ультразвукового деформирования являются существенные потери энергии на механический гистерезис вследствие знакопеременного упругого нагружения металла очага деформации в каждом цикле колебаний. В работе получено значение параметра "сопротивление потерь" в виде

$$R_n = \frac{Z_0 k}{q} \psi \quad , \quad \text{где} \quad (15)$$

для радиальной составляющей потерь

$$\psi_r = 2\pi l r_3 (r_3 - r_{on}) \quad ,$$

для окружной составляющей

$$\psi_\tau = \pi l (r_3^2 - r_{on}^2) \quad ,$$

q - добротность материала (табличное значение); r_3 - среднее значение наружного радиуса очага деформации; r_{on} - радиус оправки.

При этом мощность потерь определяется выражением

$$N_n = \omega^2 (U^2 R_{nr} + U_u^2 R_{n\tau}) \quad , \quad (16)$$

где U_u - амплитуда колебательных смещений конуса матрицы относительно оси оправки (определяется ниже, при решении эквивалентных схем).

Для учета влияния упругости оправки и матрицы на условия передачи мощности в очаг деформации был использован метод эквивалентных схем, в которых упругость учитывалась параметром "упругое сопротивление"

$$\chi = \frac{Q_m}{i\omega U} \quad , \quad (17)$$

где i - мнимая единица.

Параметр χ был определен для трех стандартных элементов:
- "цилиндр без осевого отверстия"

$$\chi = \frac{2\pi E h_u}{\omega(1-\nu)} \quad , \quad (18)$$

где h_u - высота цилиндра, E, ν - упругие константы материала;
- "цилиндр со свободным осевым отверстием"

$$\chi = \frac{2\pi E h_u}{\omega(K_r - \nu)} \quad , \quad (19)$$

где
$$K_r = \frac{d_n^2 + d_0^2}{d_n^2 - d_0^2}$$

d_0, d_n - внутренний и наружный диаметры цилиндра;
 - "тонкостенный цилиндр, передающий колебания с наружной поверхности на внутреннюю"

$$\begin{aligned} \chi_r &= \frac{\pi E h u_0}{\omega} \frac{(d_i + d_0)}{(d_i - d_0)}, \\ \chi_\tau &= \frac{4\pi E h u_0}{\omega} \frac{(d_i - d_0)}{(d_i + d_0)}, \end{aligned} \quad (20)$$

где χ_r, χ_τ - радиальная и окружная составляющие параметра χ .

В работе показано, что при использовании метода эквивалентных схем возможна замена с достаточной точностью очага деформации и технологического инструмента эквивалентной механической схемой, равной мощности и упругости. Решая эквивалентную схему, получают значение U_u выражения (16) и в комплексном виде - обобщенный параметр Z_n , который характеризует очаг деформации совместно с технологическим инструментом как потребителя колебательной мощности, подводимой к наружной поверхности матрицы

$$Z_n = R + iX. \quad (21)$$

Параметр Z_n необходим для расчета ультразвуковой оснастки.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОСНАСТКИ

В работе на основе выполненного анализа предложена наиболее рациональная для процесса УЗРД оснастка, в которой ультразвуковые колебания в резонансной волоке возбуждаются от группового ультразвукового привода посредством резонансного волокодержателя. Такая оснастка технологична и позволяет подводить в очаг деформации колебательную мощность требуемой величины. Расчет волокодержателя и резонансной волоки производился путем анализа резонансной осесимметричной системы с осевым отверстием, нагруженной на внутреннем крае упруго-поглощающей нагрузкой Z_n - технологическим инструментом и очагом деформации. Решение выполнялось на основе анализа управления движения и закона Гука для осесимметричного нагружения:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} &= \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \nu \frac{U}{r} \right) \\ \sigma_\varphi &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{U}{r} + \nu \frac{\partial U}{\partial r} \right) \end{aligned} \right. \quad (22)$$

После преобразований получены уравнения для определения резонансных радиусов волокна r_1 и волокодержателя r_2 :

$$\delta^2 + \gamma^2 - \gamma \left[\frac{N_1(kr_1)}{J_1(kr_1)} + \frac{\chi_1}{\Psi_1} \right] - \frac{\chi_1 N_1(kr_1)}{\Psi_1 J_1(kr_1)} = 0, \quad (23)$$

$$J_1(kr_2) - \gamma N_1(kr_2) = 0,$$

а также значения составляющих параметра "сопротивление нагрузки", приведенных к наружному краю волокодержателя:

$$R_2 = \alpha \lambda / (\alpha^2 + \beta^2) + \rho \xi (\alpha X + \beta R) / (\alpha^2 + \beta^2), \quad (24)$$

$$X_2 = \beta \lambda / (\alpha^2 + \beta^2) + \rho \xi (\beta X - \alpha R) / (\alpha^2 + \beta^2),$$

где $\alpha, \beta, \lambda, \xi$ - функции геометрических размеров, нагрузки, упругих констант.

Для решения уравнений (23,24) разработаны специальные номограммы и графики. При исследовании решения использовали ЭЦМ.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Баланс мощностей, затрачиваемых на осуществление процесса, имеет вид

$$N = (N_{\phi} + N_{\tau}) + N_{\text{ин}} + N_1 + N_2 + N_i, \quad (25)$$

где $(N_{\phi} + N_{\tau})$ - составляющие мощности, затрачиваемой на формоизменение и трение на контактных поверхностях на участке $t_1 - t_2$ периода колебаний; $N_{\text{ин}}$ - составляющая мощности, затрачиваемая на преодоление инертности заготовки, трубы и матрицы; N_2 - составляющая мощности, затрачиваемая на трение при подаче заготовки в очаг деформации; N_i - прочие составляющие.

$$N_i \approx N_{\Gamma} + N_{\text{эм}} + N_0, \quad (26)$$

где N_{Γ} - мощность, затрачиваемая в генераторах при получении высокочастотных электрических колебаний; $N_{\text{эм}}$ - мощность, затрачиваемая при преобразовании электрических колебаний в механиче-

ские; N_0 - мощность, затрачиваемая на нагрев оснастки (волонодержателя и волокна) от упругих колебаний.

При этом КПД при ультразвуковом деформировании определяется из выражения

$$\eta = \frac{N_{\Phi}}{N_{\Phi} + N_{\Gamma} + N_{\Pi} + N_1 + N_2} \quad (27)$$

Общий КПД с учетом всех видов потерь

$$\eta_{\Sigma} = \eta \cdot \eta_{\Gamma} \cdot \eta_{\text{эм}} \cdot \eta_0 \quad (28)$$

Из анализа исследований в работе маршрутов волочения получены следующие интервалы изменения составляющих мощности (если принять $N_{\Phi} = 1$): $N_{\Gamma} \approx (0,5 \dots 0,3)$, $N_{\Pi} \approx (0,2 \dots 0,6)$, $N_1 \approx (0,08 \dots 0,43)$, $N_2 \approx (0,15 \dots 0,84)$. При этом $\eta \approx (0,11 \dots 0,25)$, т.е. существенно ниже, чем КПД простого процесса прокатки (для прокатки по А.А.Хейну $\eta \approx 23,7\%$, по В.Н.Выдрину $\eta \approx 38,9\%$).

С учетом всех видов потерь энергии для используемых в настоящее время оборудования и материалов $\eta_{\Gamma} \approx 0,5$; $\eta_{\text{эм}} \approx 0,5$; $\eta_0 \approx 0,8$, откуда получено значение $\eta_{\Sigma} \approx (0,22 \dots 0,05)$.

Таким образом, процесс ультразвукового деформирования неэкономичен по сравнению с процессами прокатки и может быть рекомендован для производства продукции, которая не изготавливается более экономичными способами. Однако промышленностью в настоящее время осваивается выпуск более совершенной ультразвуковой оснастки, при использовании которой процесс УЗРД приблизится по удельным затратам энергии к роликовой прокатке труб.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАДИАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Задачей теоретических исследований на математической модели и экспериментальных - в лабораторных и производственных условиях, явилась отработка основных элементов технологии производства труб методом ультразвукового радиального деформирования. Наряду с этим

производились замеры величин продольного усилия, скорости, амплитуды колебаний ультразвуковой оснастки, величины радиального давления на рабочем конусе матрицы. Производились также замеры толщины стенки по периметру заготовки и готовой трубы. При этом оценку точности производили путем сравнения коэффициентов вариации, определенных из выражения

$$\bar{V} = \frac{\sigma_c}{\bar{t}} 100\% \quad , \quad (29)$$

где σ_c - среднее квадратическое отклонение толщины стенки от номинального значения; \bar{t} - средняя толщина стенки.

Экспериментальные исследования, проведенные на широком сорimente тонкостенных холоднодеформированных труб, показали, что точность разработанных аналитических зависимостей для определения параметров процесса ультразвукового деформирования вполне приемлема для их практического использования.

Исследование позволило выявить ряд специфических особенностей процесса, которые необходимо учитывать при проектировании и использовании его в производственных условиях.

Прежде всего, эффективность воздействия колебаний существенно зависит от скорости процесса. Для рассмотрения условий оптимальные скорости не превышают (0,1...0,2) м/с, что не позволяет процессу УЗРД достичь производительности волочильных станов, однако при производстве особотонкостенных и профильных труб сортамента станов ХНТР, позволяет повысить производительность в (5...10) раз.

Далее, процесс характеризуется повышенными потерями энергии, вызванными циклическим нагружением очага деформации и инструмента. В работе рекомендованы мероприятия, направленные на уменьшение нерациональных потерь энергии:

- максимальное повышение жесткости оправки, например, путем выполнения ее из твердого сплава;
- понижение величины окружной упругости матрицы - за счет выполнения на части ее толщины радиальных целевых прорезей;
- выбор оптимального соотношения между параметрами "сопротивление нагрузки" R_n очага деформации и "упругое сопротивление" $\chi_{оп}$ оправки. Рекомендовано оптимальное соотношение $\chi_{оп} \cong (5...10)R_n$;
- выбор материала оснастки с минимальными потерями на внутреннее трение вследствие циклического приложения нагрузки.

Для снижения нерациональных потерь энергии и повышения эффективности процесса рекомендуется использовать оптимальные соотношения геометрических размеров оправки, матрицы и обоймы волокна, оправдавшие себя на практике: $h_{оп} = l + (1,5 \dots 2,5)t_{оп}$, $h_M = l + (1,5 \dots 2,5)t_M$, $h_g = h_M + (1,5 \dots 2,5)t_M$, $h_{оп}$, h_M , h_g - осевой размер оправки, матрицы и обоймы волокна; $t_{оп}$, t_M - радиальная толщина оправки и матрицы.

В работе показано, что процесс УЗРД характеризуется повышенными радиальными давлениями на участке деформирования цикла колебаний и пониженным - на участке подачи заготовки. Указанное благоприятное сочетание делает его перспективным для изготовления особотонкостенных труб и профилей, требующих течения металла в участки калибра с затрудненными условиями деформирования - тонкостенных труб с пазами и ребрами.

Из анализа выявлено существенное влияние на условия деформирования угла матрицы α . С увеличением угла отмечается большее снижение усилия на малых скоростях ($< 0,1$ м/с), а с уменьшением угла - менее интенсивный рост усилия натяжения от скорости. Таким образом, угол α является эффективным параметром при выборе рациональных условий проведения процесса УЗРД.

Важной особенностью процесса, с точки зрения требований к ультразвуковому приводу, является изменение в широких пределах параметра R очага деформации при изменении технологических режимов - в процессе заполнения очага деформации, при изменении скорости, смене материала, переходе на другой размер. Поэтому привод должен обладать достаточным быстродействием и автоматической подстройкой параметров в широком диапазоне изменения нагрузки.

Обработка результатов измерений стенки холоднокатаной заготовки и трубы показала возрастание точности геометрических размеров труб, полученных методом УЗРД. В среднем значение коэффициентов вариации толщины стенки, определенных из выражения (29), уменьшилось в 1,65 раза. При этом отклонение размеров определялось точностью инструмента и несоосностью диаметров заготовки. Наведенная холодной прокаткой разностенность практически устранена полностью.

В условиях Первоуральского новотрубного завода была изготовлена партия прецизионных тонкостенных труб для машиностроителей размером $\phi 25,0 \times 0,5$; $\phi 25,0 \times 0,45$; $\phi 25,0 \times 0,4$ с ужесточенным

допуском на толщину стенки $\pm 0,02$ мм, удовлетворявшая техническим условиям заказчика.

Технология УЗРД была использована при изготовлении двухслойных труб с межслойными каналами для энергомашиностроения. Полученная заготовка наружного слоя трубы с межслойными каналами высокой точности обеспечила при последующей сборке и уплотнении слоев получение двухслойных труб необходимого качества. Трубы успешно выдержали испытания у заказчика.

Разработанная технология использовалась также при изготовлении прямоугольных труб для приборостроения из сплава 29НД, в частности, размером $28,75 \times 15,0 \times 1,0$, радиусом сопряжения полок $\leq 0,5$ мм и допуском на утолщение стенки в углах профиля $+0,04$ мм. Полученные трубы соответствовали требованиям технических условий.

В работе указаны перспективы использования процесса УЗРД, обусловленные постоянно возрастающими требованиями машиностроителей и энергетиков к качеству осеботонкостенных и профильных труб, получаемых холодной деформацией. Использование процесса позволит радикально повысить точность геометрических размеров получаемых труб при одновременном существенном увеличении производительности оборудования.

Методики расчета технологии и оснастки процесса УЗРД переданы для использования при проектировании Иркутскому заводу тяжелого машиностроения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ различных схем подвода в очаг деформации ультразвуковых колебаний при волочении труб. Установлено, что для тонкостенных и профильных труб повышенной точности наиболее рациональным является процесс волочения с использованием радиальных колебаний.

2. Разработана методика расчета конематических и энергосиловых параметров процесса волочения тонкостенных труб с использованием ультразвуковых радиальных колебаний. Впервые получены аналитические зависимости для определения мощности и амплитуды колебаний в зависимости от технологических параметров процесса: усилия волочения, угла матрицы, скорости, коэффициента трения, механических свойств металла. Произведен расчет основных параметров процесса волочения с использованием полученных зависимостей.

3. Разработана методика учета влияния конструктивных и упругих характеристик технологического инструмента на условия передачи колебательной мощности в очаг деформации. Установлено, что нерациональные потери энергии снижаются при увеличении жесткости оправки и при понижении окружной жесткости матрицы. Из анализа работы инструмента в процессе деформирования рекомендованы оптимальные соотношения геометрических размеров и материалов оправки, матрицы и обоймы волоки.

4. Разработана методика расчета ультразвуковой оснастки, обеспечивающей подвод в очаг деформации необходимой мощности. Полученные методики использованы при разработке установки и технологии волочения тонкостенных и профильных труб размером 15...50 мм.

5. Пригодность разработанных методик расчета усилий, амплитуд, мощности колебаний и др. для практического использования подтверждена сравнительным анализом математической модели и результатов экспериментальных исследований. Как правило, отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышало 10...12%, максимальное отклонение - не более 15%.

6. В результате исследования процесса ультразвукового волочения установлено существенное влияние на условия деформирования ряда технологических параметров, в частности, скорости волочения и угла волоки. Установлено, что оптимальные скорости волочения лежат в интервале (0,1...0,2) м/с, а угол волоки является эффективным параметром при выборе оптимальных условий передачи колебательной мощности в очаг деформации.

7. Разработанная технология ультразвукового волочения использована при изготовлении труб повышенной точности, в частности, тонкостенных труб $\varnothing 25,0$ мм с толщиной стенки (0,4...0,5) мм и допуском на толщину стенки $+0,02$ мм; прямоугольных труб с отношением радиуса сопряжения граней к толщине стенки $\leq 0,5$ и утолщением стенки в углах профиля менее 5%; двухслойных труб с межслойными каналами повышенной точности.

8. На основании анализа результатов теоретического и экспериментального исследования показано, что наиболее перспективной областью использования рассмотренного процесса является производство прецизионных осеботонкостенных труб, а также профилей, требующих течения металла в участки калибра с затрудненными условиями деформирования, например, профильных труб, труб с пазами и ребрами.

9. Экономический эффект от внедрения результатов работы составил 130 тыс. рублей.

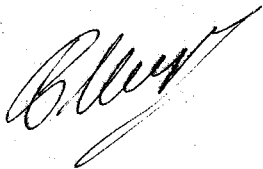
Основное содержание диссертации изложено в публикациях:

- Расчет радиально-колеблющегося ультразвукового инструмента с нагрузкой на внутренней поверхности. - Акустический журнал. АН СССР, т. XXIII, I, М., 1977, с. 30...33 (соавторы Блинов Ю.И., Погудин М.И.);
- Волочение с продольными ультразвуковыми колебаниями оправки. Бюллетень Черметинформации, 1974, № 15, с. 33, 34 (соавторы Блинов Ю.И., Бондаренко В.П.);
- Силовые условия при ультразвуковом волочении труб. - Депо- нир. рукопись. 2, 310, Р.Ж.Металлургия, 1976, с. 58 (соавтор Блинов Ю.И.);
- Расчет величины активного сопротивления нагрузки процесса ультразвуковой радиальнойковки (УЗРК) тонкостенных труб. - Опыт применения ультразвука в черной металлургии, г.Тула, 1977, с. 10...12.
- Расчет величины активного сопротивления нагрузки процесса деформации труб на оправке с использованием радиальных колебаний матрицы. - Депо нир. рукопись. Р.Ж.Металлургия, 5д498;
- Расчет величины полного сопротивления нагрузки при ультразвуковой радиальнойковке (УЗРК) труб. - Опыт применения ультразвука в черной металлургии, г.Тула, 1977, с. 12, 13 (соавтор Бондаренко В.П.);
- Настройка и испытание опытной установки для деформации труб ультразвуковой радиальнойковкой. - Опыт применения ультразвука в черной металлургии, г.Тула, 1977, с. 13, 14 (соавторы Блинов Ю.И., Алешин В.А., Бондаренко В.П., Белоусов Г.А.);
- Технологические характеристики процесса деформации труб на оправке с использованием радиальных колебаний инструмента. - Применение ультразвука в технологических процессах металлургического производства, г.Запорожье, 1983, с. 27, 28 (соавтор Блинов Ю.И.);
- Выбор материала и конструкции инструмента для оправочного волочения труб с использованием радиальных колебаний. - Применение ультразвука в технологических процессах металлургического производства, г.Запорожье, 1983, с. 29, 30 (соавтор Блинов Ю.И.);

- А.с. № 531584 (СССР). Устройство для волочения металла с ультразвуковыми колебаниями волокна. Б.И. № 38, 1976 (соавторы Блинов Ю.И., Бондаренко В.П., Погудин М.И.);

- А.с. № 715164 (СССР). Устройство для волочения металла с наложением ультразвуковых колебаний на инструмент. Б.И. № 6, 1980 (соавторы Блинов Ю.И., Бондаренко В.П.);

- А.с. № 825222 (СССР). Устройство для волочения с наложением радиальных ультразвуковых колебаний. Б.И. № 16, 1981 (соавторы Блинов Ю.И., Алешин В.А., Бондаренко В.П., Белоусов Г.А.).



Подписано в печати 10.09.85 г. ФБ 32370. Формат 60x90 1/16.
Печ. л. I. Уч.-изд. л. I. Тираж 100 экз. Заказ 393/937.

УОП ЧПИ. 454044, г. Челябинск, пр.им. В.И. Ленина, 76.